



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Implementación del método de análisis de falla para la reparación de una bomba recíprocante (Estudio de caso)

Martha Liliana Alonso Romero
Luis Carlos Bayona Aparicio

Fundación Universitaria Los Libertadores
Facultad de ingeniería
Bogotá D. C. , Colombia
2018

Implementación del método de análisis de falla para la reparación de una bomba reciprocante (Estudio de caso)

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Director:

Magíster en Ingeniería Mecánica - Ing. Edwin Darío Cendales Ladino

Línea de Investigación:

Análisis de falla, fractografía e ingeniería de superficies.

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de ingeniería

Bogotá D. C. , Colombia

2018

Dedicatoria

Martha Alonso: Con todo mi cariño y mi amor para las personas que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento. Especialmente para mi mamá que ya no está con nosotros, pero siempre me acompaña y cuida desde el cielo con todo su amor.

Luis Carlos Bayona: Gracias a esas personas importantes en mi vida, que siempre estuvieron listas para brindarme toda su ayuda, ahora me toca regresar un poquito de todo lo inmenso que me han otorgado. Con todo mi cariño esta tesis se las dedico a ustedes.

Proyecto de grado aprobado por la Facultad de Ingeniería de la Fundación Universitaria Los Libertadores en cumplimiento de los requisitos exigidos para otorgar el título de: **Ingeniero Mecánico.**

Magíster en Ingeniería Mecánica - Ing. Edwin Darío Cendales Ladino
Director de Proyecto de grado

Ing.
Jurado

Ing.
Jurado

Ing.
Jurado

Lista de Figuras

1-1. Datos técnicos de la Bomba.	4
1-2. Funcionamiento Power end (Schlumberger).	5
1-3. Cuerpo de Potencia bomba triplex reparada.	6
1-4. Funcionamiento Fluid end (Schlumberger).	7
1-5. Carcasa Principal vista frontal, vista lateral.. . . .	7
1-6. Cigüeñal.	8
1-7. a). Cross head. b) Rodamientos cónicos.	8
1-8. a). Bomba principal de lubricación forzada. b) O-ring parker (Manual Parker, 2017).	9
1-9. a) y b). cabezal Hidráulico (bomba triplex FMC manual de partes). c) Caja de empaques.	10
1-10.a) y b). Válvula de disco estándar con centro guiado instalada en el cabezal . c) Asiento de válvula.	11
1-11.a) y b). Válvula de disco estándar con centro guiado instalada en el cabezal . c) Émbolo o plunger.	11
1-12. Metodología de análisis.	12
2-1. Inspección inicial.	15
2-2. Inspección inicial de la carcasa.	16
2-3. a) Inspección de la carcasa en la mandrinadora. b). Corrosión en el lado libre de la carcasa. c). Metrología de la carcasa. d). Mediciones de linealidad. . .	16
2-4. Inspección eje de alta.	18
2-5. Inspección engranaje de baja.	19
2-6. Inspección muñón de biela N°1 lado acople.	20
2-7. Comparación de las bielas.	20
2-8. a) Inspección del Cross head No.1 fracturado. b). Inspección de Cross head No. 2 fracturado, mismo patrón de falla.	21
2-9. Bulón que debe reemplazarse junto con los Cross head.	22
2-10.a) Buje de cabeza de biela. b). Pony road (metalizar). c). Bomba de lubricación forzada.	22
3-1. Carcasa	23
3-2. Inspección de linealidad en la mandrinadora.	24

3-3. Metrología carcasa.	24
3-4. Mecanizado del cigüeñal.	25
3-5. Medición planitud de la biela.	26
3-6. Reparación mediante mecanizado de la biela.	27
3-7. Reparación tapa biela, cepillado y mecanizado de la guía circular hembra macho.	27
3-8. a.) Referenciación y ampliación guía tubular. b). Verificación del círculo y rectificación de diámetros.	28
3-9. Holguras en las bielas.	28
3-11. Mecanizado, cilindrado y metalizado del Pony rod con soldadura en frío <i>Eutalloy</i>	29
3-12. a). Referencias de rodamientos utilizados en el equipo. b). Componentes ne- cesarios para la reparación de la bomba.	30
3-10. a). Reparación patín: Soldadura con Níquel 100 b). Recuperación del círculo en mandrinadora con ampliación de agujero. c) Encamizado para reforzar el diámetro interno del patín y la posición original con el ajuste de $3\mu\text{in}$	31
4-1. a). Medición de los bujes ($3\mu\text{ in}$ de ajuste), b). Instalación y prueba de los pasadores.	32
4-2. Instalación y prueba del prisionero y bielas del patín.	33
4-3. Instalación de los tres cross head (casquetes y cigüeñal).	33
4-4. Instalación eje de alta (Calentamiento e instalación).	34
4-5. Armado completo del conjunto y ensamble del cigüeñal.	35
4-6. Torqueado de las bielas y verificación de ajuste del torque.	35
4-7. Instalación Eje de baja	35
7-1. Ensayos no destructivos cross head	40
7-2. Reporte de partículas magnéticas cigüeñal (a).	41
7-3. Reporte de partículas magnéticas cigüeñal (b).	42
7-4. Reporte de partículas magnéticas cigüeñal (c).	43
7-5. Metrología de los componentes de la bomba (a).	44
7-6. Metrología de los componentes de la bomba (b).	45
7-7. Metrología de la carcasa. a). Medición de la colinealidad entre círculos. b). Medición de perpendicularidad.	46

Resumen

El presente trabajo de grado ilustra la implementación de un método de reparación del power end de una bomba reciprocante para reducir costos y evitar la compra de los componentes nuevos, realizando las restauraciones necesarias de los componentes localmente, cumpliendo con los estándares más altos de calidad para garantizar la operación del equipo. Además, se busca identificar cuáles son las consideraciones de mantenimiento y diseño para prevenir al operador del manejo adecuado de estas bombas.

Bombas reciprocantes, Power end, falla, biela, fatiga, Fluid end.)

Abstract

The present degree work shows the implementation of a method of repairing the final power of a reciprocating pump to reduce repair costs and avoid the purchase of the new components, performing the necessary restore of the components locally, meeting the highest quality standards to ensure the operation of equipment. It also seeks to identify the maintenance and design considerations to prevent the proper handling of these pumps.

Keywords: (Reciprocating pumps, Power end, failure, fracture, connecting rod, fatigue, Fluid end.)

Contenido

Resumen	XI
1. Introducción	2
1.1. Identificación del Problema	3
1.2. Objetivo General y Objetivos Específicos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Bombas reciprocantes	3
1.4. Componentes de la Bomba Hidraulica	4
1.4.1. Power End	4
1.4.2. Fluid End	6
1.4.3. Carcasa principal	6
1.4.4. Eje Principal ó Cigüeñal	7
1.4.5. Patin (Crosshead) y Rodamientos (Cojinetes)	7
1.4.6. Bomba de Lubricación Forzada y Sellos de la bomba	8
1.4.7. Cabezal Hidráulico (Fluid End) y Cajas de Empaques	9
1.4.8. Válvulas de Succion/Descarga	10
1.5. Metodología de análisis	12
2. Metodología	14
2.1. Evaluación	14
2.1.1. Cuerpo de Potencia(Power Frame)	14
2.1.2. Carcasa	15
2.1.3. Eje de Alta	17
2.1.4. Engranaje de Baja	18
2.1.5. Cigüeñal	19
2.1.6. Bielas	20
2.1.7. Cross Head	21
2.1.8. Bulones del Patín	21
2.1.9. Bujes de Cabeza de Biela	22
2.1.10. Pony Rod	22
2.1.11. Bomba de Aceite	22

3. Reparaciones	23
3.1. Carcasa	23
3.2. Cigüeñal	25
3.3. Bielas	25
3.4. Reparación patín	28
3.5. Pony Rod	29
3.6. Rodamientos	29
4. Armado del conjunto	32
5. Análisis de resultados recomendaciones generales	36
5.1. Temperatura	36
5.2. Ruido	37
5.3. Falta de verificación del pony rod	37
5.4. Recomendaciones generales	37
6. Conclusiones	39
7. Anexos	40
Bibliografía	47

1 Introducción

Una bomba es una máquina que transforma la energía mecánica en energía hidráulica, generalmente usada para aumentar la presión de un fluido o mover un fluido de una zona de menos presión/altitud a una zona de mayor presión /altitud. Dentro de la clasificación de bombas encontramos las bombas de desplazamiento positivo y dentro de esta clasificación se encuentran las reciprocantes de pistón y émbolo [3].

En las bombas reciprocantes de pistón se crea un vacío parcial dentro del cilindro permitiendo que el producto bombeado se eleve ayudado por la presión atmosférica. Como hace falta un determinado de tiempo para que se llene el cilindro, en estas bombas los elementos obturantes van colocados en el pistón y en las bombas de émbolo los elementos obturantes van colocados en una caja de empaques y se deslizan sobre el émbolo que es completamente liso; la cantidad de fluido que entra al espacio de desplazamiento dependerá de la velocidad de la bomba. Dentro de la ventajas que tiene una bomba de este tipo es una eficiencia mecánica del 85 al 94 %, además de ser un equipo silencioso que funciona a altas presiones manejando fluidos con altas viscosidades. Por otra parte, las desventajas son los costos muy altos en reparación.

Los daños ocasionados por la pérdida de lubricación más conocidos y sus características son:

- Daño de casquetes.
- Giro de casquetes en el muñón de la biela.
- Daños en los muñones del cigüeñal.
- Deformación de la biela por fricción.
- Fractura de los engranajes de potencia.
- Deformación en la carcasa.
- Alta vibración y destrucción de la bomba.
- Generación de micro fisuras y fractura del cigüeñal.
- Destrucción del rodamiento daño en el cigüeñal
- Fractura de los engranajes de potencia

Por los daños mencionados anteriormente se puede determinar que la reparación de un equipo en la industria puede ser muy costoso, con este documento presentaremos una solución para la reparación de este equipo, y cómo a través de la evaluación de las piezas internas se encontró como reducir los costos de importación de componentes nuevos y reducción de tiempos en la puesta en operación de la bomba.

1.1. Identificación del Problema

Tener un equipo tan costoso que no está en operación es un problema para la industria, y si esta industria se enfrenta a una recesión en la cual la consecución de los repuestos nuevos se hace inviable, tenemos que dar formas de reparación adecuadas y que cumplan con las normas de que rigen la industria. De donde ¿Cuál sería el método de reparación de un daño catastrófico de una bomba reciprocante reduciendo los costos y tiempos de no operatividad del equipo para la industria petrolera?

1.2. Objetivo General y Objetivos Específicos

1.2.1. Objetivo General

Implementar el método de reparación del *power end* de una bomba reciprocante con el fin de reducir los costos evitando comprar los componentes nuevos mediante la reparación de los componentes localmente.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar la evaluación correspondiente a todos los componentes del POWER END.
- Realizar los END a los componentes afectados del POWER END.
- Realizar la verificación dimensional de la carcasa.
- Realizar la reparación de cada una de los componentes encontradas con daño como el muñon, la biela, cross head y los bujes.
- Elaborar un artículo científico en el cual se plasmen los aspectos más relevantes de la reparación

1.3. Bombas reciprocantes

Las bombas reciprocantes existen hace 2000 años, estas no fueron populares hasta 1840 cuando Henry R. Worthigton inventó la bomba de vapor. Tempranamente las maquinas

simples fueron avanzando a productos reciprocantes hasta hoy en muchas industrias, durante los últimos 30 años, la tecnología ha permitido mejorar las centrífugas y otros tipos de bombas más populares como las maquinas reciprocantes [3].

Una bomba reciprocante es una máquina que usa un movimiento alternativo para permitir que un fluido que se mueva de una locación a otra. El desplazamiento positivo es la forma más común de una bomba reciprocante. Este tipo de bombas atrapa un volumen fijo de fluido y lo desplaza desde la succión hacia la descarga, mediante unas válvulas de retención colocadas en el lado de succión y una en el de descarga. El movimiento se consigue desplazando un volumen fijo de fluido que es directamente proporcional a la velocidad.

La bomba reciprocante utilizada en este proyecto es una bomba con designación genérica de bomba triplex que se aplica a cualquier tipo de bomba con tres pistones, estas bombas son las más eficientes para el bombeo de fluidos abrasivos a alta presión (1000 psi y más) además de ser las que menos mantenimiento requieren.

Estas bombas que funcionan como aspirante-impelente, cada pistón debe contar con dos válvulas, una de admisión y otra de descarga, la de admisión tiene baja presión permitiendo la entrada del fluido en la carrera de aspiración.

Technical data on the triplex direct acting			
Capacity	up to	259,5	USgpm
Delivery	up to	1035	ft
Temperature	up to	681	°F
Speed	up to	108	rpm
Flange drilling	up to	ANSI or BS	

Figura 1-1: Datos técnicos de la Bomba.

1.4. Componentes de la Bomba Hidraulica

Las bombas reciprocantes como la que vamos a trabajar en este proyecto, toman fuerza de una fuente externa como un motor de combustión interna, un motor eléctrico o una turbina y la transmite a un cigüeñal para mover un juego de válvulas. Estas bombas se hallan en configuración vertical y/o horizontal, el movimiento de estas bombas puede hacerse por medio de cajas de engranajes reductores o poleas; además existen bombas simples (un émbolo o pistón) dúplex, triplex, quintuplex, septuplex y nonumplex [4].

1.4.1. Power End

Se encarga de convertir la energía de rotación en energía de movimiento alternativo. Funciona como un cigüeñal de un automóvil. El cigüeñal es movido por el eje del piñón mediante

los engranajes principales, transformando la rotación las excéntricas del cigüeñal del eje principal en un movimiento alternativo. A las bielas se transmite esta potencia, desplazando los pistones que se encuentran en el fluid end.

El Power End reduce la velocidad, multiplica el par, cambiando el movimiento giratorio en movimiento alternativo. Toma la energía creada por el motor y la transforma en energía que puede ser utilizada por el extremo del fluido. Los extremos de alimentación se maquinan para cumplir con los requisitos del trabajo y conservan el espacio en el remolque o unidad de camión. Desde principios de la década de 1970, las bombas de fracturación han sido equipadas con engranajes Cone Drive, mientras que las bombas de cementación tienen equipos de engranajes Holroyd o Delroyd [2].

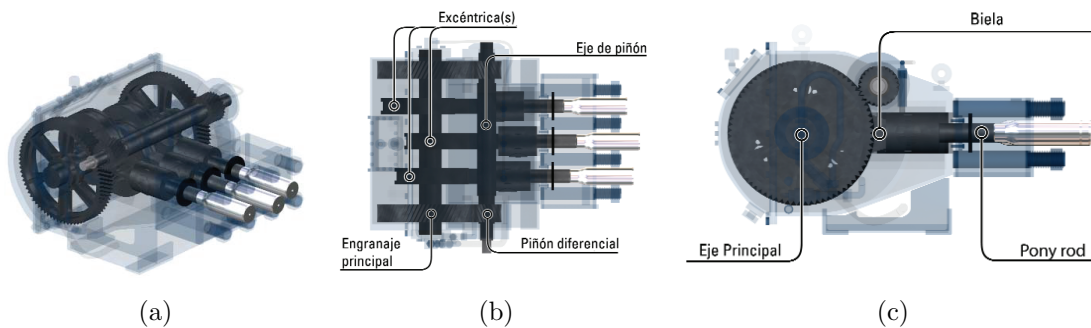


Figura 1-2: Funcionamiento Power end (Schlumberger).

El componente más susceptible a daño en las bombas reciprocantes es la caja de potencia (*power end*) la cual está constituida por un cigüeñal, bielas, casquetes y rodamientos. Por la velocidad del equipo muchas de estas bombas tienen un sistema de lubricación por salpicadura, el cual es muy susceptible al daño si el nivel de aceite en el cárter no es el adecuado [1].

Con el fin de evitar la pérdida de presión de aceite en la lubricación interna del cuerpo de potencia, los fabricantes de estos equipos implementaron una bomba de desplazamiento positivo de tipo engranajes, la cual toma su potencia del eje de entrada y mantiene la presión de aceite en forma constante en el power end.



(a)

Figura 1-3: Cuerpo de Potencia bomba triplex reparada.

1.4.2. Fluid End

El *fluid end* utiliza el movimiento alternativo creado por el extremo de la potencia para bombear el fluido de trabajo. Este dispositivo recibe la energía del power end.

Esta parte recibe el fluido de baja presión, transmite potencia al fluido y lo descarga a alta presión. Este dispositivo es similar a un motor reciprocante por su acción de bombeo mecánico convencional de combustión interna o un compresor de aire de pistón. El fluid end estándar (conocido formalmente como Fluid end de la bomba) y el HCLE (alta concentración, baja erosión) son dispositivos que hacen parte del equipo para su funcionamiento adecuado [2].

1.4.3. Carcasa principal

Construida en fundición de hierro gris o de hierro fundido moldeable (no nodular o esferoidal) por medio de alojamientos diseñados y mecanizados en ella, se instalan los componentes que conforman la parte de potencia de la bomba.

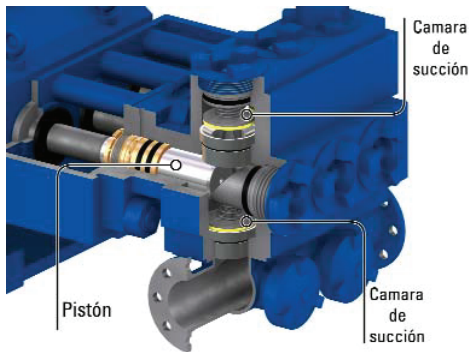


Figura 1-4: Funcionamiento Fluid end (Schlumberger).



Figura 1-5: Carcasa Principal vista frontal, vista lateral..

1.4.4. Eje Principal ó Cigüeñal

Por medio de muñones excéntricos transforman el movimiento circular recibido en movimiento alternativo lineal. Este construido en acero fundido, acero forjado y fundición de hierro maleable según la aplicación. La presión ejercida por la presión de descarga sobre el émbolo o pistón se transmite a través del patín y la biela a los casquetes de la misma. Esta presión da el límite máximo al cual se puede operar la bomba, esta información la suministra el fabricante para cada unidad.

Como norma general la presión de succión no debe superar el 15 % de la presión de descarga, para permitir que en la carrera de succión el aceite lubricante llene el espacio entre el casquete y el cigüeñal.

1.4.5. Patin (Crosshead) y Rodamientos (Cojinetes)

El croshead también es conocido con diferentes nombres como cruceta y Patín. Esta encargado de recibir y transmitir el movimiento desde la biela por medio de un pasador alojado



Figura 1-6: Cigüeñal.

en su cuerpo en un extremo y una pieza de extensión al émbolo o pistón en el otro extremo y se desplaza a lo largo de una pista mecanizada en la carcasa. Por su parte los rodamientos se encargan de soportar y guiar los componentes en los movimientos diversos que efectúan, pueden ser de rodillos cilíndricos, rodillos cónicos, esféricos, de bolas de cuerpos enterizos o partidos (bujes, chumaceras) (Rodamientos referencia ZY005994114CDZV29).

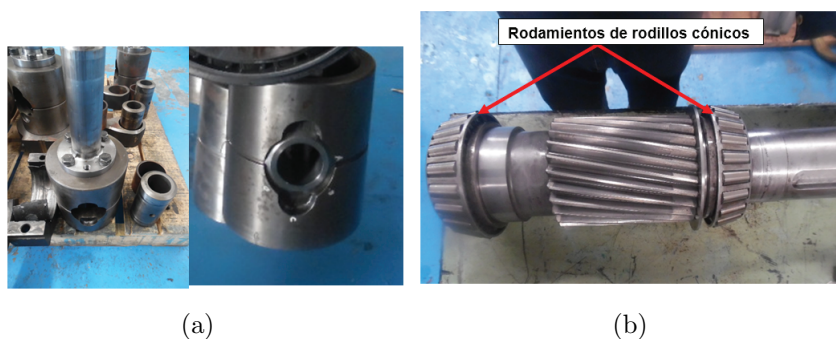


Figura 1-7: a). Cross head. b) Rodamientos cónicos.

1.4.6. Bomba de Lubricación Forzada y Sellos de la bomba

Se encarga de suministrar el aceite a presión a los diferentes puntos de fricción de la bomba, por galerías internas en la carcasas y el cigüeñal y tuberías en cobre que dirigen el flujo de aceite a los puntos más calientes del equipo, usualmente son de tipo rotativa de engranajes internos o engranajes externos. Esta bomba toma la potencia del engranaje de baja potencia. Por otra parte los sellos tienen la función es clausurar el lubricante dentro de la bomba (retenedores, anillos en $^{\circ}$.en "V", el grupo de empaques más conocidos son de *Parker*).

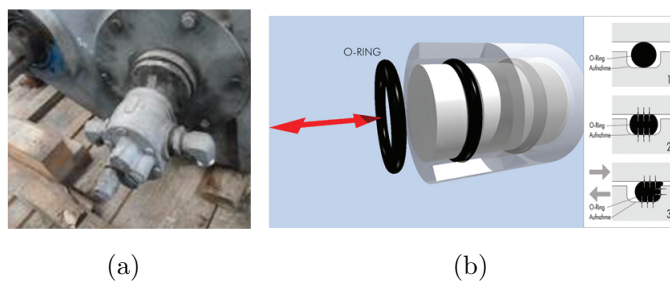


Figura 1-8: a). Bomba principal de lubricación forzada. b) O-ring parker (Manual Parker, 2017).

1.4.7. Cabezal Hidráulico (Fluid End) y Cajas de Empaques

El Fluid End es considerado el componente principal de la bomba y esta construido de diversas materiales según la aplicación de la bomba en la relación con el fluido que deba manipular, las presiones a que vaya a bombear y la temperatura del fluido.

Para productos derivados del petróleo, estos bloques de fluidos, se construyen en acero al carbono forjado o acero inoxidable forjado, según normas establecidas por el instituto americano del petróleo(API).

Los diseños de estos cabezales incluyen barrenos que se intersectan y que por diseño están limitados a una presión máxima hasta de cerca de 20000 Psi, aun con materiales de alta resistencia forjados.

Este bloque esta especialmente diseñado en las bombas reciprocantes para alojar y soportar los diferentes componentes tales como: válvulas de succión y descarga, cajas de empaquetaduras, conexiones de succión y descarga, alojamientos para tapas de inspección, entre otros.

Además de los conductos adecuados, para permitir al fluido su recorrido desde la conexión de succión hasta la descarga. Los bloques de fluidos en las bombas de émbolos son de diseño sencillo comparados con los utilizados en las bombas de pistón de doble acción debido a que constan de doble número de válvulas a las usadas en las bombas de pistón sencillas.

De otro lado en la caja de empaques se encuentran los empaques que impiden los escapes del producto bombeado a la atmosfera. Igualmente están diseñados para recibir en su interior una serie de componentes tales como el buje de garganta, los anillos seguidores del empaque, y la tuerca de ajuste de la empaquetadura. Su diseño y construcción se lleva a cabo según las presiones y productos manejados por la bomba. Su instalación se efectúa en el bloque de fluidos en el lado que mira hacia la caja de potencia con el objeto de permitir la continuidad del movimientos alternativo transmitido por el cigüeñal a los émbolos solidarios a este a través de las bielas, cross head y piezas de extensión.

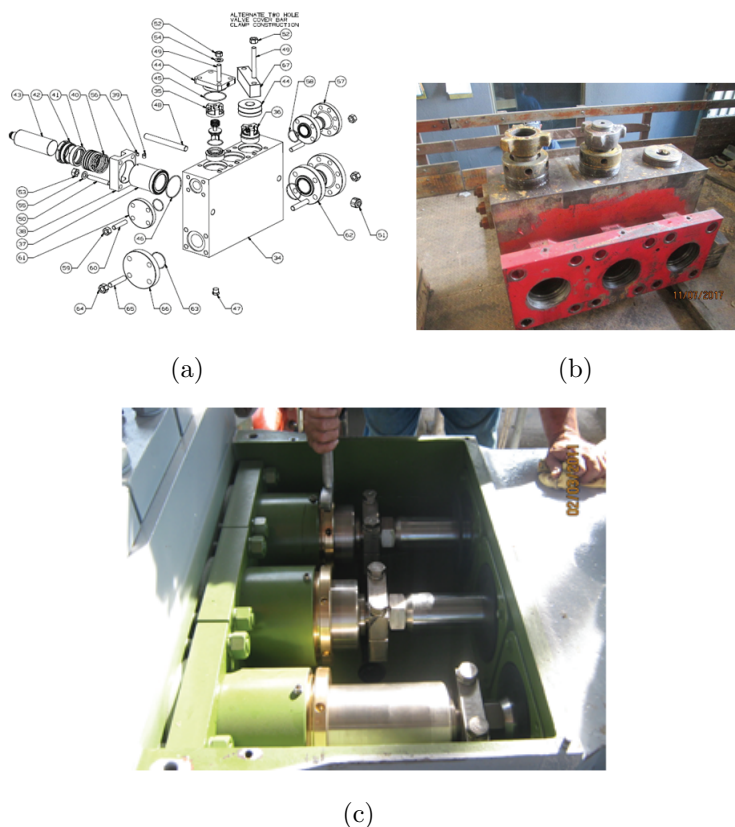


Figura 1-9: a) y b). cabezal Hidráulico (bomba triplex FMC manual de partes). c) Caja de empaques.

1.4.8. Válvulas de Succion/Descarga

Construidos de materiales de alta resistencia a la fricción y al choque (titanio) su función es sellar o clausurar el fluido durante el ciclo de succión y descarga, las válvulas se componen por lo general de las siguientes partes: Un *asiento metálico* que va fijado al bloque de fluidos por medio de un ajuste de cono morse, brown and sharpe o jacobson, para garantizar un ajuste permanente durante la operación de bombeo. Un *disco* de material sintético de alta resistencia cuya función es ajustarse perfectamente a la superficie del asiento produciendo el sellado entre las cámaras de succión y la de presión cuando el émbolo o pistón se halla comprimiendo el fluido o entre la línea o tubería de descarga y el recinto de compresión mientras el émbolo o pistón efectúa su ciclo de bombeo. Un *resorte* construido de acero de alta aleación y resistencia, esta destinado a ejercer una presión de precarga que obliga al disco o válvula a permanecer cerrada mientras la bomba se encuentra fuera de funcionamiento y mientras no se halla alcanzando una presión inferior en la cámara de succión con respecto a la entrada del fluido y superior en la cámara de descarga con respecto a la presión del tubo de descarga de la bomba. Para diferentes tipos de operación se utilizan diferentes tipos de

constante para determinar la apertura y cierre de la válvula. Un *Émbolo o pistón* Su función principal es producir un descenso de la presión en la cámara de llenado de la bomba en el ciclo de succión, permitiendo que el fluido entre y posteriormente imprimirle presión en el ciclo de descarga, su construcción es muy solida debido a la altas cargas generadas durante el bombeo, los materiales utilizados son por lo general en su núcleo, acero de bajo carbono (AISI/SAE-1020) y en su parte externa con un revestimiento o metalizado resistente a la alta fricción y temperaturas generadas por la fricción entre el émbolo y la empaquetadura de la caja de empaques, lógicamente que si las propiedades lubricantes y refrigerantes del fluido bombeado es deficiente, se instalara un sistema de lubricación externo que obviará este problema.

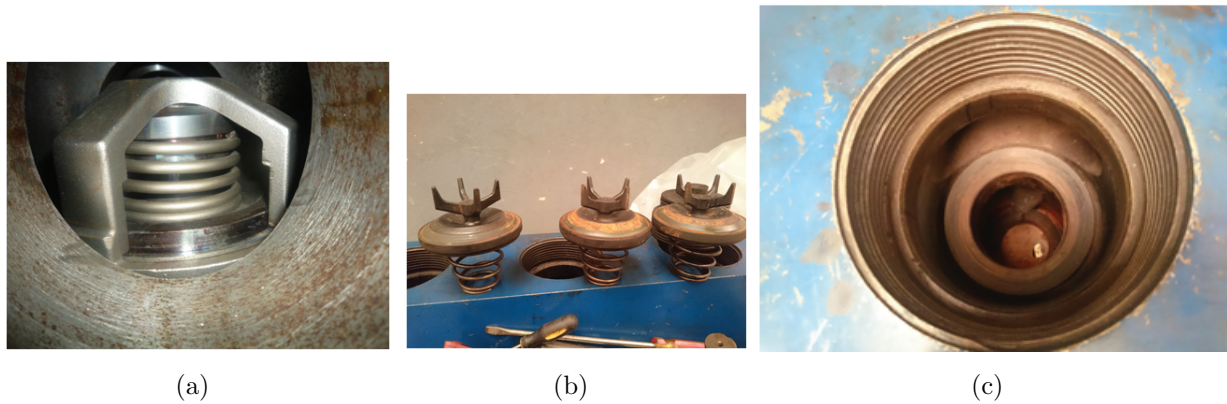


Figura 1-10: a) y b). Válvula de disco estándar con centro guiado instalada en el cabezal .
c) Asiento de válvula.

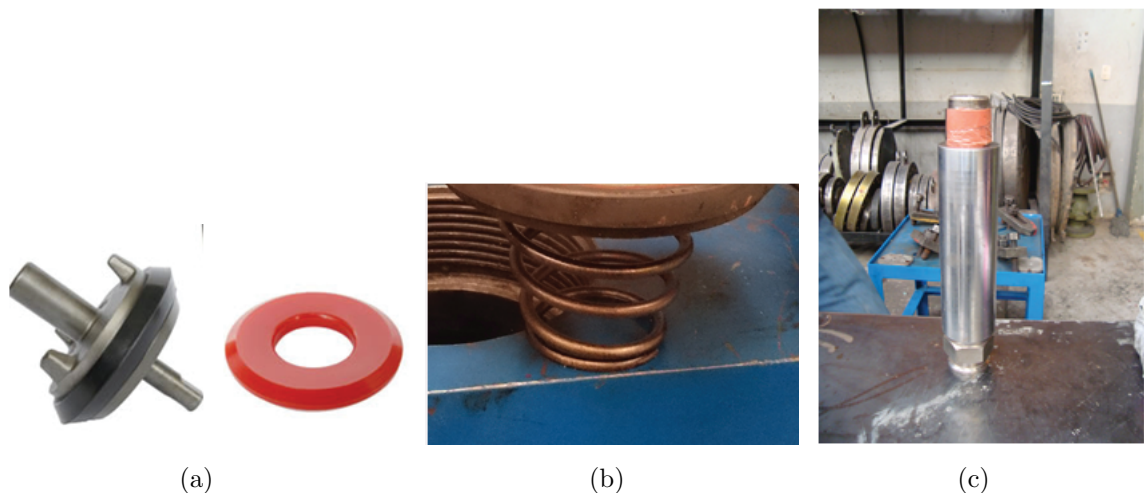


Figura 1-11: a) y b). Válvula de disco estándar con centro guiado instalada en el cabezal .
c) Émbolo o plunger.

Los términos pistón y émbolo se usan a menudo indistintamente, como si fueran la misma cosa. Esto puede conducir a la confusión es importante entender la diferencia entre los dos y utilizar el término correcto. Un elemento de bombeo del tipo de émbolo, es un vástago liso unido al mecanismo de deslizamiento / travesaño, que imparte energía al fluido bombeado para hacer que se desarrolle presión en el interior de la cámara de fluido. El elemento de bombeo de tipo pistón es el que tiene la empaquetadura de sellado, con la que imparte energía al fluido bombeado dentro del cuerpo de fluidos.

1.5. Metodología de análisis

Inicialmente para realizar un adecuado análisis de la falla de funcionamiento del equipo, se debe identificar el tipo de falla o daños, si esta es operacional o parcial, así como la importancia del impacto en el proceso a través de una evaluación (ver metodología de análisis) que permita determinar el origen de la falla de funcionamiento: El análisis de la evaluación en una bomba reciprocante con una falla o daño.

La importancia del daño es vital cuando la bomba representa un equipo crítico para el proceso y requiere hallar la razón por la que fallo.

Funciones: En cada una de sus funciones se reconoce el papel que desempeña la bomba en el sistema y su prelación.

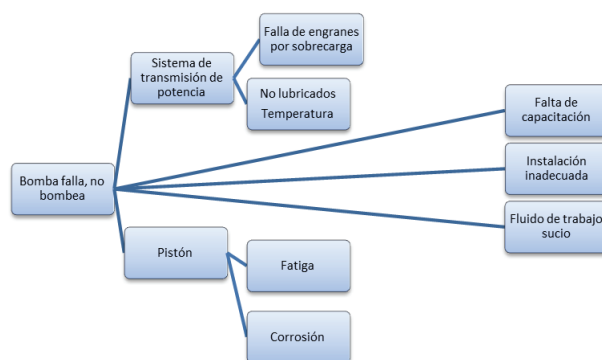


Figura 1-12: Metodología de análisis.

Falla Funcional: Identifica si la bomba falló por la falta de trasmisión de potencia o por inconvenientes de alguno de o de varios de sus componentes.

Modo de Falla: Se enumera y refiere cada uno de los elementos o componentes que generaron la falla; si fue un agente físico, humano u operacional.

Efectos de la falla: Las consecuencias de la falla de un equipo que mueve altos volúmenes de fluido como un bomba reciprocante y todos los perjuicios tanto económicos, como de tiempo operacional que afectan el proceso.

Consecuencia: Para evitar la recurrencia y los riesgos de fallas en estos equipos se debe identificar los factores que se tomarán en cuenta para prevenir todas las posibilidades de fallas; sea de transmisión de potencia, por fatiga en el pistón y todos los eventos de falla para así evitar que vuelvan a suceder.

Inventario de Fallas Funcionales: El segundo paso después de realizar la inspección en la bomba es tomar en cuenta la fallas de cada una de las diferentes componentes del equipo, para el caso de esta bomba que esta constituida por émbolos, empaquetaduras, los sistemas de engranes y poleas encargadas de la transmisión de potencia inventariando cada una.

Inventario de modos de fallas: Cuando identificamos una falla en el pistón, entonces dicho émbolo puede tener fatiga, corrosión, deformación térmica y mecánica, entre otros. Estas deben registrarse para aplicar el mantenimiento o reparación que dicha falla considere.

Categoría de las consecuencias de fallas: Para iniciar con la evaluación de las componentes se organizan las fallas según las consecuencias que tuvo en el equipo, en este caso la bomba reciprocante. Todas las fallas son categorizadas según sus impactos y su dificultad de reparación.

2 Metodología

Con el fin de realizar un adecuado análisis de la falla de funcionamiento del equipo, se debe identificar el tipo de daño, si este es operacional o del sistema y la importancia del impacto en el proceso final, a través de una evaluación que permita determinar el origen de ésta. La evaluación en una bomba reciprocante con un daño en el cuerpo de potencia se determina como el origen de la falla, para conocer su causa, más aún cuando la bomba representa un equipo crítico para el proceso y se requiere hallar la razón del daño deduciendo las correcciones operacionales o de mantenimiento necesarias.

2.1. Evaluación

La bomba reciprocante Clyde Union, Tipo:Triplex, Potencia: 600 HP, que vamos a evaluar en este proyecto corresponde a un equipo de inyección de agua para una refinería. La toma de presión en la succión es de 27 psi y la presión en la descarga es de 2700 PSI con un émbolo de 2".

El equipo presento falla en operación y fue reportado por los operadores de campo al escuchar un ruido fuerte en el cuerpo de potencia. Este equipo no tiene sensores de vibración, alarmas por alta o baja presión de descarga ni de presión de aceite lubricante, por lo cual el equipo trabajo varias horas en modo de falla. El personal de mantenimiento de la estación realizó la evaluación preliminar del equipo y al verificar que no tienen repuestos para cambio en el stock normal, decidió consultar la posible reparación para solventar la necesidad de bombeo que requiere la planta.

No se puede verificar el juego axial con el que el equipo trabajo ya que ese encontró los rodamientos envueltos en vinipel y se evidencia que la bomba fue desarmada en una ocasión posterior a la falla.

2.1.1. Cuerpo de Potencia(Power Frame)

El cuerpo de potencia de la bomba reciprocante fue desarmado por el personal del mantenimiento del cliente para su evaluación. Por esto no se encontraron parámetros como juego axial y juego radial del equipo para determinar el estado inicial de trabajo del equipo. Para iniciar el proceso de evaluación de los equipos fue necesario empezar con el inventario de partes de la bomba, para evaluar si estaban completos y con esto determinar la condición



Figura 2-1: Inspección inicial.

de cada uno de estos y así determinar el procedimiento para su reparación.

El conjunto del cuerpo de potencia está compuesto por:

- Carcasa
- Cigüeñal con dos rodamientos
- Tres bielas
- Engranaje
- Eje de alta velocidad con dos rodamientos y un piñón
- Tres cross head
- Tres pony rod

Los rodamientos del equipo se encontraron envuelto en papel plástico para evitar alguna contaminación con las partículas metálicas que dañaran las pistas.

2.1.2. Carcasa

Al realizar la revisión inicial de la carcasa se inicia con una inspección visual donde se logra evidenciar que se encuentra en buen estado exterior, pero esto debe ser corroborado con una revisión en metrología en los alojamientos de los rodamientos para descartar alguna posible fractura o desviación de la carcasa.

La carcasa se encuentra en buen estado exterior pero se deben revisar los alojamientos de los rodamientos para descartar alguna posible fractura o desviación de la carcasa. Se procedió a realizar una inspección en una mandrinadora, equipo que tiene la capacidad de verificar la alineación de los alojamientos de los rodamientos. Fig 2

Como primer paso se inició la inspección de la bomba sobre la base de mandrinadora, la cual está completamente nivelada y maquinada para descartar y verificar si las patas de



Figura 2-2: Inspección inicial de la carcasa.

la bomba están sobre el mismo plano, y descartar la pata coja o desviación que puede generar algún esfuerzo interno en el equipo, al determinar que esta desviación está dentro de tolerancias de $0.002''$, se inicia una verificación con un eje que será centrado entre los agujeros de los extremos con un palpador de rango de medición de $0.0015''$, con el cual podemos determinar la desviación máxima permisible de $0.002''$, teniendo en cuenta que es un equipo que tiene los alojamientos rectificados y presenta guías maquinadas para la instalación de los rodamientos se determina tomar sobre estas zonas las medidas pertinentes en tres secciones del alojamiento en cuatro puntos del diámetro.

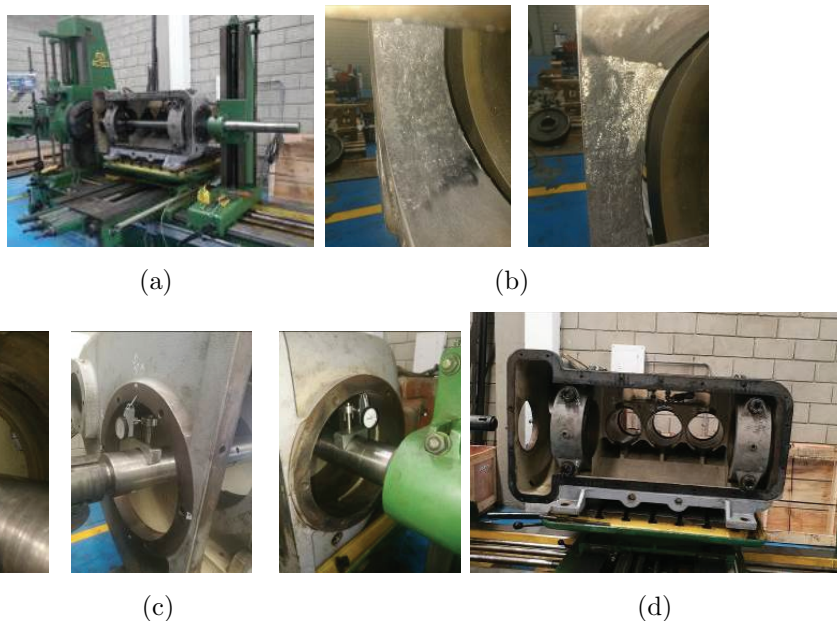


Figura 2-3: a) Inspección de la carcasa en la mandrinadora. b). Corrosión en el lado libre de la carcasa. c). Metrología de la carcasa. d). Mediciones de linealidad.

Por el daño presentado se debe verificar la carcasa en una mandrinadora para descartar una desalineación de los alojamientos del cigüeñal. Y una posible deformación del conjunto.

En las mediciones realizadas a la carcasa, se encontraron desviaciones en la circularidad y colinealidad en las que se muestra la máxima lectura de 0.005" en el rodamiento del lado acople con respecto de los alojamientos de los extremos de la carcasa; y en la perpendicularidad, la máxima desviación fue de 0.003" en las caras de apoyo axial del cigüeñal y las tapas laterales.

Teniendo en cuenta que se centró la carcasa entre un alojamiento externo del lado acople y del rodamiento del cigüeñal del lado libre., ya que en el alojamiento externo del lado libre se encontró corrosión que afectó alrededor de una tercera parte de la circunferencia.

Por lo demás queda la información metrológica consignada en el formato correspondiente.

2.1.3. Eje de Alta

Es un eje en acero AISI/SAE 4140 con alojamientos para dos rodamientos de agujas de contacto angular en los extremos con los cuales se controla la carga axial que se transmite del elemento motriz. En el centro tiene un piñón helicoidal con el cual transmite la potencia a una catalina o engranaje. El eje de alta se encuentra en buen estado, solo es recomendable reemplazar los rodamientos para garantizar la reparación del equipo. En este punto de la evaluación se determina que reemplazar las piezas implica una inversión relevante, por lo tanto, en acuerdo con el cliente no se realiza el cambio de estos elementos por el costo que implica, dado que es de cercano a los 17'000.000 COP, solo los rodamientos.

Los rodamientos no se reemplazarán por los altos costos que se generan, y la necesidad indispensable del equipo. Se programará en un próximo mantenimiento el cambio de todos los elementos.

Las pistas de rodamiento presentan huellas normales de trabajo y el juego axial de este elemento es de 0.003", que se midió con unas láminas calibradas de varios espesores (Shims). Con esta medida dentro de las tolerancias se garantiza que los dientes de los engranajes estarán trabajando centrados y dentro de las especificaciones del fabricante.

Se continúa con una verificación visual de los dientes para determinar el estado de estos ya que si alguno de estos se encuentra fisurado, partido, o con una ligera desviación, puede generar ruido y una alta vibración la cual puede causar un daño interno en el equipo. Las evidencias de trabajo muestran que la lubricación estaba operando en buenas condiciones para el engranaje y el piñón, ya que son elementos que no tiene lubricación forzada de la bomba externa, sino que parte de la lubricación de estos componentes es por salpicadura del engranaje de baja.



Figura 2-4: Inspección eje de alta.

2.1.4. Engranaje de Baja

Es un engranaje helicoidal en fundición nodular gris con un cuñero de $3/4''$ de ancho por $2''$ de longitud, con el cual se transmite la potencia al cigüeñal mediante una relación de 4.6:1 alcanzando una velocidad final de 385RPM. Este elemento estaba instalado en el cigüeñal, por lo tanto, para determinar el estado de éste fue necesario realizar una limpieza exhaustiva para retirar la corrosión y las partículas metálicas adheridas y determinar si eran de este componente.

Se realizó la aplicación de la técnica de ensayo por partículas magnéticas fluorescentes, para la detección de defectos superficiales o subsuperficiales realizados para materiales de alta permeabilidad magnética. Bajo los parámetros establecidos por ASTM E 144 (Standard Practice for Magnetic Particle Examination) y ASTM E 709 (Standard Guide for magnetic Particle Examination), se inspeccionó con el procedimiento básico de operación para los E.N.D, preparando la superficie del material y la magnetización de la pieza, aplicando las partículas magnéticas a los dientes del engranaje encontrando que el equipo se encuentra en buenas condiciones para ser reutilizado.

De igual manera, se realizó la inspección visual en la que se determinó que el estado de los dientes del engrane están con las huellas de trabajo adecuadas para el tiempo de trabajo de operación del equipo, 2 años aproximadamente (16000 horas), por lo tanto, el eje puede reutilizarse. A continuación, se ejecutó la metrología respectiva a los diámetros internos (Figura 2-5) para determinar la holgura o ajuste que este tiene con el cigüeñal, encontrando que esta medida es de $0.003''$ de ajuste, lo cual implica que se debe calentar el elemento para la instalación.



Figura 2-5: Inspección engranaje de baja.

2.1.5. Cigüeñal

Es un eje acodado con el cual se transmite la potencia de entrada por medio de las bielas y los patines a los émbolos. Con la finalidad de determinar los posibles factores que condujeran a un posible daño o la rotura del cigüeñal perteneciente a la bomba, la evaluación realizada se efectuó con varios estudios y determinaciones: Ensayos no destructivos de partículas magnéticas y mediciones de dureza. El cigüeñal en estudio presento un daño entre un muñón de biela No.1, correspondiente al lado del acople y al contrapeso más próximo a la brida de montaje con el volante. La biela que venía con este muñón estaba montada en el muñón del cigüeñal No.3. El ensayo de partículas magnéticas se realizó en Cartagena en las instalaciones del cliente, por una empresa contratista, como parte de la interventoría de la reparación.

Se evidencio que los radios de los bordes del muñón constituyen concentradores geométricos de tensión. Allí la magnitud de los esfuerzos se vio incrementada debido al cambio en la geometría de la pieza (Figura 2-6). Al efectuar las primeras inspecciones visuales en las superficies para descartar zonas dañadas se encontraron evidencias típicas del fenómeno de fatiga. Este es un mecanismo progresivo y se da como consecuencia de la acción de cargas cíclicas (fluctuantes) en el tiempo. La evidencia a la que se hace referencia son las marcas de playa las cuales corresponden a la etapa de propagación de diferentes fisuras en distintos momentos y valores de carga de trabajo.

Para descartar cualquier micro fisura en el cigüeñal y determinar si se puede reparar se debió realizar un análisis de partículas magnéticas fluorescentes, este ensayo debió ser autorizado por el cliente (Ver Anexo Adjunto). Se efectuaron ensayos no destructivos de partículas magnetizables en el cigüeñal, bajo los parámetros establecidos por ASTM E 144 (Standard Practice for Magnetic Particle Examination) y ASTM E 709 (Standard Guide for magnetic Particle Examination); a través de los cuales se corroboró que en todos los radios de vinculación entre los contrapesos y los muñones de biela no existen fisuras. Las fisuras en los radios

pueden presentarse en la mayoría de los casos como ramificaciones denotando un elevado esfuerzo. Como resultado de los E.N.D se determina que el cigüeñal no tiene ningún daño catastrófico, con lo cual se puede realizar la reparación de los muñones del cigüeñal a su diámetro de trabajo de 7.025”.



Figura 2-6: Inspección muñón de biela N°1 lado acople.

2.1.6. Bielas

Es un elemento que transmite la potencia y está sometido a esfuerzos de tensión y compresión durante varios momentos de su operación. En la verificación de torcedura de la biela No.1 se encuentra una lectura de 0.004” y en las bielas 2 y 3, se encuentra una lectura de 0.001”. Se procedió a determinar si la distancia entre centros de círculos es la misma en los 3 componentes, con el fin de determinar si las bielas pueden ser reutilizadas (Figura 2-7).



Figura 2-7: Comparación de las bielas.

La distancia entre centros de la biela No.1 del conjunto tiene una desviación de 0.004” con referencia a las otras dos. Es recomendable realizar el cambio de este elemento.

2.1.7. Cross Head

El crosshead es un tipo de pistón fabricado con una fundición de hierro que proporciona la alineación precisa entre la biela y el pistón o émbolo. El primer paso para la evaluación del Cross head No.1 fue una inspección visual, en la que se evidencio una fisura y desprendimiento de parte del material en el alojamiento del bulón. Para el caso de los demás Cross head no se evidenciaron fisuras, pero el procedimiento que se sigue es realizar los respectivos END (Ensayos no destructivos), para lograr determinar con más detalle el estado de estos componentes. Realizando la inspección del Crosshead No. 2 externa e interna, mediante el método húmedo donde se agrega partículas verdes (partículas magnéticas) se resaltó un daño en la rosca del prisionero que ajusta el pasador para evitar que este se desplace saliendo de su posición natural de trabajo.

En el momento del desarmado, se observó que está atascado diagonalmente por el esfuerzo del pasador y la biela en el momento de la falla, también con el mismo patrón la falla. Para iniciar el trabajo de reparación de este componente fue necesario realizar un análisis de materiales para determinar el adecuado proceso de soldadura (WPS).

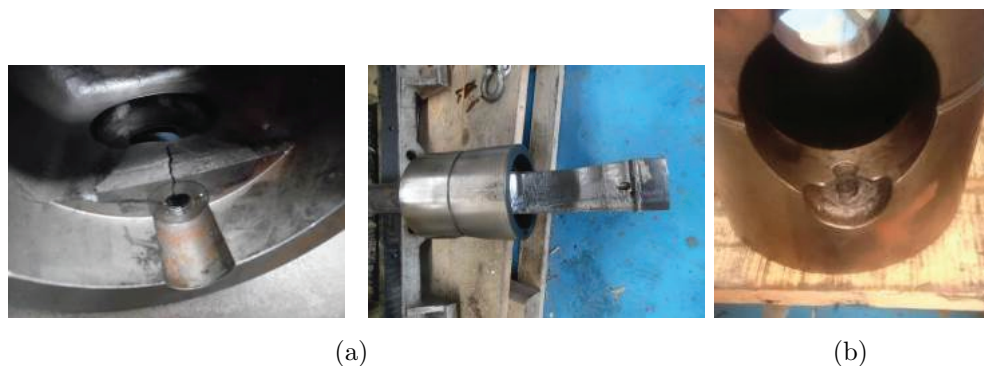


Figura 2-8: a) Inspección del Cross head No.1 fracturado. b). Inspección de Cross head No. 2 fracturado, mismo patrón de falla.

Este Cross head venía con dos prisioneros ajustados uno encima del otro, pero el bulón salió libre, lo que nos ratifica que el prisionero no estaba realizando la debida sujeción.

2.1.8. Bulones del Patín

Los bulones se deben reemplazar junto con los dos patines, ya que no es un elemento que se deba metalizar para recuperar la holgura con el buje (Figura 2-9).



Figura 2-9: Bulón que debe reemplazarse junto con los Cross head.

2.1.9. Bujes de Cabeza de Biela

El buje de cabeza está fabricado en bronce (SAE 64), que funciona como cojinete entre el bulón y el Cross head. Estos elementos deben ser reemplazados, por lo tanto, fueron retirados para la verificación y metrología de las bielas (Figura 2-10-a).

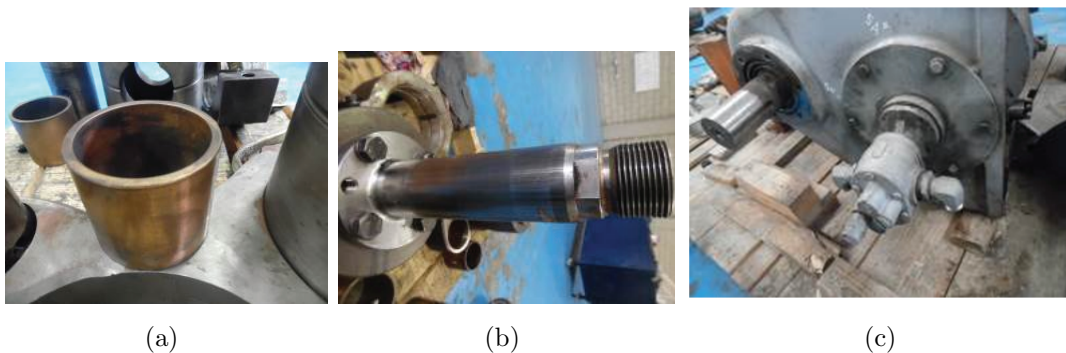


Figura 2-10: a) Buje de cabeza de biela. b). Pony road (metalizar). c). Bomba de lubricación forzada.

2.1.10. Pony Rod

Extensión del patín que está alineado y se conecta con el émbolo en acero 4140 con una dureza de 32 HRC. Estos elementos se encuentran desgastados, se recomienda su metalización para garantizar que la empaquetadura no se desgaste en corto tiempo (Figura 2-10-b).

2.1.11. Bomba de Aceite

Este elemento se verificó y se recomendó realizar el cambio de todos los kit de O-ring y empaquetaduras (Figura 2-10-c).

3 Reparaciones

3.1. Carcasa

Por el daño que presenta el cigüeñal de la bomba se realizó la verificación de concentricidad de los alojamientos, para esto fue necesario montar el equipo en la mandrinadora donde se pudo realizar la operación encontrando una desviación de $0.002''$.



(a)

Figura 3-1: Carcasa

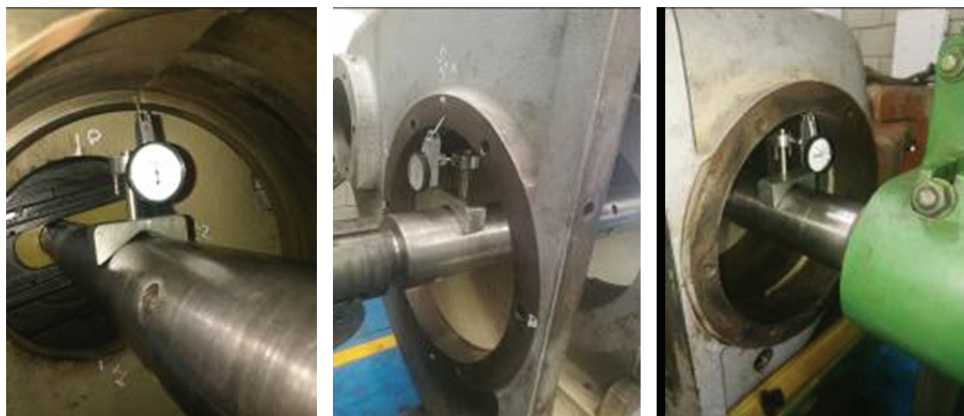
Al determinar que esta desviación está dentro de tolerancias de $0.002''$, se inicia una verificación con un eje que será centrado entre los agujeros de los extremos con un palpador de rango de medición de $0.0005''$; con el cual podemos determinar la desviación máxima permisible de $0.002''$ en los alojamientos internos de trabajo de los rodamientos.



(a)

Figura 3-2: Inspección de linealidad en la mandrinadora.

En las mediciones realizadas a la carcasa, se encontraron desviaciones en la circularidad y colinealidad, en las que se muestra la máxima lectura de 0.002" en el rodamiento del lado acople con respecto de los alojamientos de los extremos de la carcasa y en la perpendicularidad, la máxima desviación fue de 0.003" en las caras de apoyo axial del cigüeñal y las tapas laterales.



(a)

Figura 3-3: Metrología carcasa.

En uno de los alojamientos donde se realizó el centrado del eje para la metrología se encontró erosión sobre la superficie de contacto para el equipo de medición, lo que generó que el centrado solo se realizara sobre el 80 % de la circunferencia, esto no afectó la lectura de verificación final para determinar el estado general de los apoyos. Por lo demás queda la información metrológica consignada en el formato anexo.

3.2. Cigüeñal

Para garantizar la precisión y teniendo en cuenta todas las medidas necesarias, se instala el cigüeñal en la rectificadora y se realizó la medición sobre los muñones de biela y los muñones de bancada con comparadores de carátula y micrómetros de exteriores; posteriormente se procede a rectificar con una piedra de esmeril que es refrigerada, en este momento ambas piezas se mueven. Después de rectificar los muñones de bancada, se hacen modificaciones a la posición del cigüeñal, para que queden excéntricos, en este punto se rectifican por parejas los muñones. Dando una profundidad de 1 mm, como solicitud del correcto procedimiento de soldadura en frío. El cigüeñal se reparó siguiendo con los estándares establecidos para la reparación de este tipo de componentes, dejando el diámetro del muñón del cigüeñal en 7.025", diámetro original. Con una dureza de 40 HRC. Se corrigen los radios de empalme de la soldadura para que el acabado de estos no deteriore los casquetes reduciendo su vida útil.



(a)



(b)

Figura 3-4: Mecanizado del cigüeñal.

3.3. Bielas

La biela afectada en el daño fue verificada dimensionalmente con el fin de compararla con las demás bielas del conjunto que se observan en buenas condiciones. En la inspección se

evidencio que este componente se afectó doblándose longitudinalmente en 0,004" con respecto a las otras dos bielas del conjunto, para poder utilizar la biela se determinó realizar un mecanizado en una fresadora en aras de garantizar planitud de 0.001" y dejarla dentro de tolerancias originales de fabricante. El mecanizado no afecta su funcionalidad operativa ya que la corrección no es mayor a 0.006", corrigiendo esta planitud podemos garantizar que la medición para ubicar los centros de los agujeros es muy precisa.



(a)

Figura 3-5: Medición planitud de la biela.

Como la falla de la biela deforma la cabeza ovalando el diámetro de trabajo de los casquetes, se hizo necesario realizar el mecanizado de los apoyos de la tapa de la biela, en 0.005", esto con el fin de que al montar la tapa de la biela, esta cierre completamente garantizando que la guía que es el mismo tornillo de cierre, ajuste con el torque de manual 125 lb-ft. Al realizar la inspección de las guías encontramos que solo una entra, la otra se deforma de tal manera que quedo deformado el agujero, para poder reutilizar el elemento, se diseñó un sistema adicional; un casquillo tubular que se insertó en la biela para que el ajuste sea hembra-macho en la tapa, con esto se puede dejar fija la cabeza de biela. Con esta reparación la biela queda funcional para garantizar que el mecanizado del diámetro de trabajo de los casquetes se mantenga cuando la tapa de la biela se retire para montar los casquetes en el armado.

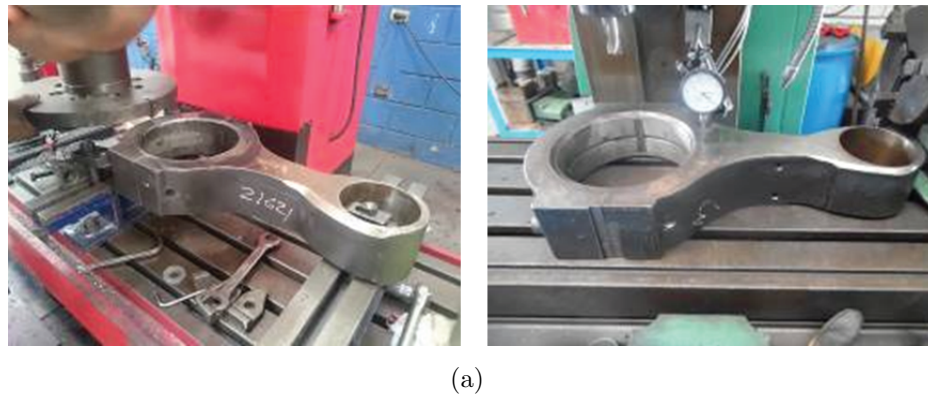


Figura 3-6: Reparación mediante mecanizado de la biela.

Se continua con el centrado del agujero de la cabeza de biela con el control numérico de la fresadora, esta actividad fue verificada con un alexómetro análogo calibrado con una precisión de 0.0002". Ubicando el centro, se desplaza la mesa de la fresadora longitudinalmente hasta ubicar el centro del agujero de trabajo del casquete, conservando las medidas de las bielas en buenas condiciones, la longitud es de 8" exactas. Al llegar a la medida original se procede a montar en el mandril de la fresadora los elementos de corte que mecanizaran el diámetro externo de trabajo de los casquetes a 8.058".

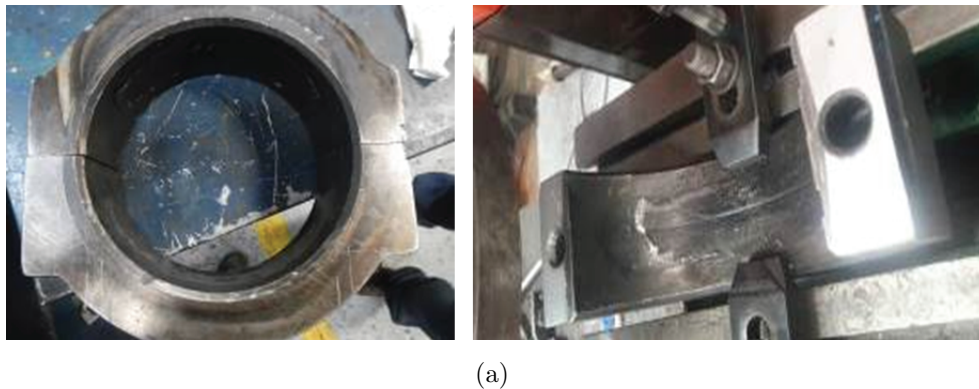


Figura 3-7: Reparación tapa biela, cepillado y mecanizado de la guía circular hembra macho.

Al realizar la reparación de la biela, podemos determinar que la longitud total entre centros es la misma en las tres bielas. Se procede a realizar el mecanizado de la guía de los casquetes para que el ajuste con la biela sea el recomendado por el fabricante, estas guías están diseñadas para que el casquete no se gire en operación. Se realiza una inspección de la superficie, la cual no es lo suficientemente lisa para la instalación de los casquetes, por esto es necesario realizar un pulimiento de la superficie con una bruñidora de cilindros la cual garantiza el acabado superficial de la biela.

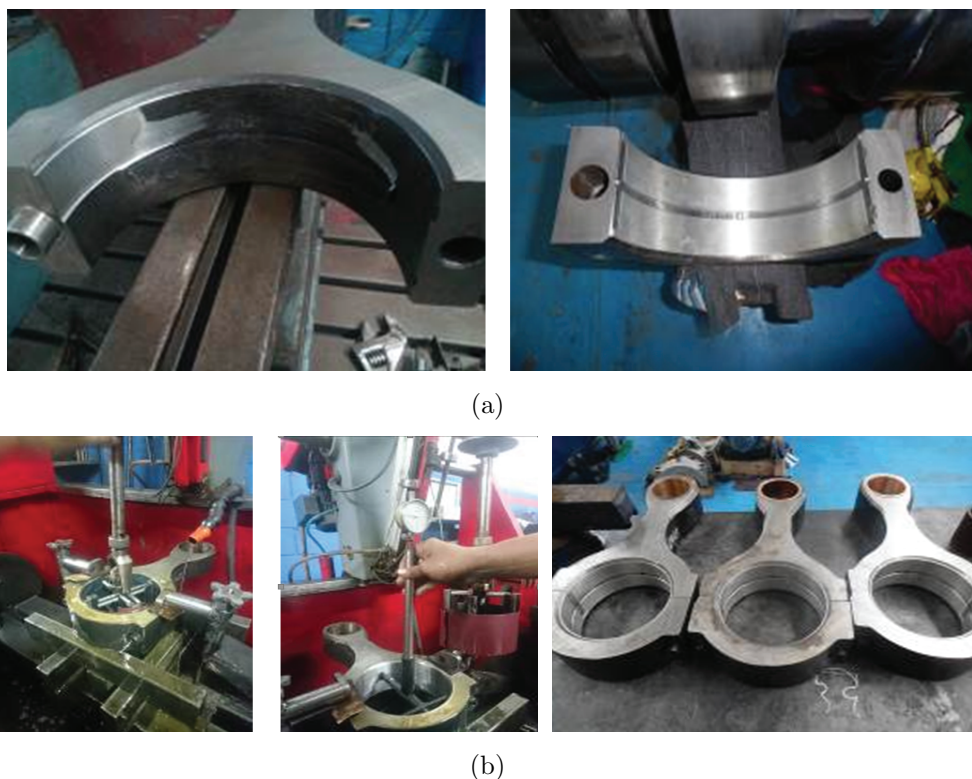


Figura 3-8: a.) Referenciación y ampliación guía tubular. b). Verificación del círculo y rectificación de diámetros.

Para determinar si la holgura es la adecuada, verificamos teóricamente que por cada pulgada de diámetro del muñón del cigüeñal tenemos 0.0012" de holgura, esto nos da como resultado las 0.008" que tienen las otras dos bielas de holgura con el cigüeñal. Con esto demostramos que el desgaste de la bomba no es superior a 0.001" durante el tiempo de trabajo del equipo en campo.

Holgura teórica	Diámetro del muñón	Holgura demostrada
0.008"	7.025"	0.008"

(a)

Figura 3-9: Holguras en las bielas.

3.4. Reparación patín

Se encontró el alojamiento del pasador en el patín con un desprendimiento del borde en el área de la rosca para lo cual se realizó la reconstrucción con soldadura y posteriormente mecanizado de la superficie hasta recuperar dimensiones originales. Para garantizar una mayor

resistencia en las roscas fue necesario reubicarlas al lado contrario donde se generó la ruptura, esto no influye en la operación correcta del equipo. (Ver anexos pruebas no destructivas Cross head). Se realiza el mecanizado del alojamiento en el Cross head para incrementar su diámetro con el fin de insertar un buje de refuerzo estructural en acero 4140.

3.5. Pony Rod

Se realizó el metalizado de la superficie rallada por la empaquetadura del equipo, esto se realizó para evitar deteriorar la empaquetadura nueva que se instaló en el cuerpo de potencia. Se garantizó la dureza de 46 HRC mediante la medición con un equipo calibrado.



(a)

Figura 3-11: Mecanizado, cilindrado y metalizado del Pony rod con soldadura en frío *Eutalloy*.

3.6. Rodamientos

Los rodamientos no se reemplazarán debido a los altos costos que se generan y la necesidad indispensable del equipo. Se programará en un próximo mantenimiento el cambio de todos los elementos.

CANTIDAD	REFERENCIA
4	K-94700TIM ROD. RODILLOS CONICOS
2	K-94114 CDTIM PISTA DOBLE
2	K-653TIM ROD.RODILLOS CONICOS
2	K-665TIM ROD.RODILLOS CONICOS

(a)

ITEM	NOMBRE	CANTIDAD
1	BIELA CIGÜEÑAL	1
2	CROSS HEAD	2
3	CASQUETES CIGÜEÑAL	3
4	BUJES DE CABEZA DE BIELA (BRONCE)	3
5	RODAMIENTOS CIGÜEÑAL	2
6	RODAMIENTOS EJE DE ENTRADA	2
7	RETENEDORES PONY ROAD.	6
8	EMPAQUETADURA BOMBA DE ACEITE	1
9	EMPAQUETADURA CARTER CIGÜEÑAL	1
10	BULONES	3
11	SHIMS DE CALIBRACION JUEGO AXIAL	1
12	RETENEDOR LABIO EJE DE ALTA	1
13	O-RINGS SELLO TAPAS PONY ROD	3

(b)

Figura 3-12: a). Referencias de rodamientos utilizados en el equipo. b). Componentes necesarios para la reparación de la bomba.



(a)



(b)



(c)

Figura 3-10: a). Reparación patín: Soldadura con Níquel 100 b). Recuperación del círculo en mandrinadora con ampliación de agujero. c) Encamizado para reforzar el diámetro interno del patín y la posición original con el ajuste de $3\mu\text{in}$.

4 Armado del conjunto

El procedimiento empleado para el ensamble final del equipo es el empleado por el fabricante en el manual de reparación el cual se detallará a continuación. Para comenzar el armado de la bomba procedemos a realizar el armado del conjunto de biela y patín pasador, para esto es necesario realizar el montaje de los bujes de bronce de la cabeza de biela el cual se hace con hielo seco ya que el ajuste de estos elementos es de $0.003''$; como es un elemento que tiene un área transversal tan pequeña no se debe realizar el calentamiento de la cabeza de biela para el montaje del buje. Proseguimos con la comprobación para que el pasador se deslice en el patín y en la biela.



(a)



(b)

Figura 4-1: a). Medición de los bujes (3μ in de ajuste), b). Instalación y prueba de los pasadores.

Al alcanzar la temperatura ambiente se realiza la metrología del diámetro la cual se cerró en 0.003", se debe pulir para alcanzar la holgura 0.005"; esta operación se realizará en la bruñidora de cilindros, para garantizar una superficie que permita la lubricación del pasador y el buje. Para el montaje del pasador con el patín se debe tener especial cuidado con los componentes que son pesados y solo pueden ser manejados entre dos personas.

Se procede a montar la biela dentro del patín hasta alinear los agujeros de las dos piezas y se procede a insertar el pasador con el objetivo de realizar el ajuste de este con un prisionero, el cual entra roscado en el patín y libre en los pasadores donde tiene un alojamiento que garantiza quede centrado.



(a)

Figura 4-2: Instalación y prueba del prisionero y bielas del patín.

Con el conjunto armado se procede a realizar el izaje del cigüeñal con unos cáncamos certificados para 4 toneladas; se debe garantizar que quede completamente nivelado esto para garantizar que la biela pueda cerrar en el momento del montaje evitando dañar el casquete.



(a)

Figura 4-3: Instalación de los tres cross head (casquetes y cigüeñal).

Al momento de realizar el montaje del casquete en la biela se debe realizar la lubricación adecuada con aceite SAE 32, el cual garantizara que no contaminara el aceite de trabajo. Se procede a realizar el montaje de la biela y el ajuste con la tapa en el muñón del cigüeñal.

Con el conjunto completamente armado continuamos con el montaje de la catarina en el cigüeñal, por el tipo de ajuste de $0.003''$, se debe realizar el calentamiento del engranaje para la instalación. Inmediatamente después de terminar el armado del conjunto se procede a ejecutar la instalación del conjunto completo dentro de la carcasa, la cual se debe poner en posición vertical para instalar el cigüeñal con todo el conjunto de bielas y patines.

Esta actividad es de especial cuidado ya que se debe garantizar la alineación del patín con el cilindro de la carcasa, esta actividad debe realizarse con los tres patines. Se baja el cigüeñal en el bastidor de potencia, donde se puede ser necesario ajustar las posiciones de los patines a medida que baja la manivela.



(a)

Figura 4-4: Instalación eje de alta (Calentamiento e instalación).

En el momento en que los rodamientos del cigüeñal queden instalados en sus alojamientos se garantiza que el cigüeñal se puede soltar de los puntos de izaje, para proceder a realizar el montaje de las tapas que cierran con un sistema de torque especial.

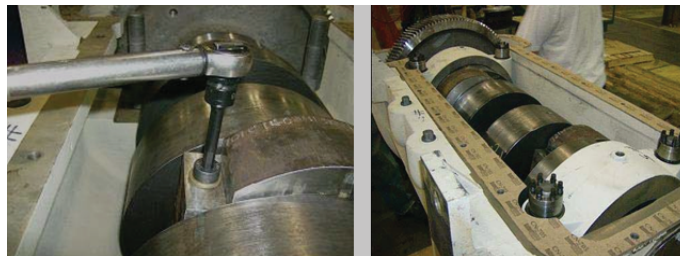
Se realiza la instalación de las tuercas en los pernos de soporte apretando con los dedos y luego damos giro de $1/4$ de vuelta, se aprietan tres (3) de los pernos del gato de las tuercas a 35 lb-ft. Repetimos este paso en todos los espárragos antes de proceder a subir el valor de torque a 55 lb-ft en sentido circular para terminar. Finalmente, apretamos los tornillos de la tapa de la biela a 130 lb-ft.

Se instala el piñón de alta velocidad en la carcasa teniendo especial cuidado en la manipulación, ya que mientras no se instale la tapa de posicionamiento este se deslizará, saliendo de su posición de trabajo. Instalamos todos los tornillos en la tapa final con un apriete los pernos a 55 lb-ft. Se realiza la medición del juego axial final del piñón el cual es $0.003''$.



(a)

Figura 4-5: Armado completo del conjunto y ensamble del cigueñal.



(a)

Figura 4-6: Torqueado de las bielas y verificación de ajuste del torque.



(a)

Figura 4-7: Instalación Eje de baja

5 Análisis de resultados recomendaciones generales

En análisis principal que se encuentra en esta investigación es que parte del problema inicial es la falta de previsión respecto a la bomba dado que se pudieron evitar estas fallas, como haber identificado indicios de un problema de cavitación y lubricación que es una de las principales causas de deterioro de las bombas triplex durante su funcionamiento, especialmente cuando la bomba cavita y las tuberías de succión y descarga vibran violentamente. En este caso se evidenció que se perdió presión de la bomba de lubricación por la fractura de una de las líneas de succión de la bomba. En ambos casos, el resultado ocasiona una falla en la operación como sucedió con el equipo analizado en este proyecto.

Evaluación de las diferentes hipótesis de lo sucedido a la bomba antes de la revisión interna del equipo:

- Se utilizó para presurizar, una bomba deteriorada o dañada que no mantiene la presión adecuada en el manifold de succión de la bomba de lubricación forzada.
- Había una fuga de aceite en el manifold de succión de la bomba de lubricación, ocasionando pérdida de presión en el sistema. El bombeo fue demasiado rápido como para que la bomba de engranajes pudiera abastecer un caudal de fluido suficiente al power end a la bomba triplex.
- La cámara no estaba llena de líquido y el pistón paso de succión a descarga. Dado que el pistón no empujó fluido hacia la descarga, comprimió el vapor causando un cambio de en la carga de la bomba y la velocidad del pistón, lo cual ocasiono una gran tensión en el power end y fluid end, generando la falla mecánica de la bomba reciprocante triplex.

5.1. Temperatura

El power end durante la operación se debió verificar frecuentemente en manómetro para establecer la lubricación y temperatura del cuerpo. Se considera que estuvo recalentado, esto quiere decir que la bomba estuvo en funcionamiento durante mucho tiempo a una potencia igual o cercana a la máxima a alta temperatura.

5.2. Ruido

En ocasiones seguramente no se prestó atención a identificar los ruidos extraños, como chasquidos o golpes. En esta situación se pudo originar por excéntricas flojas, agrietadas o chavetas dañadas, engranajes principales o piñones diferenciales dañados, cojinetes principales, pony rod o cojinetes de bielas gastados o dañados, cigüeñal principal dañado. Los problemas registrados en el fluid end también en ocasiones pueden haber sido confundidos con los ruidos del power end. Si se hubiera examinado el fluid end podrían haber descartado esta posible fuente de ruidos o golpeteos.

5.3. Falta de verificación del pony rod

La falta de verificación de los sellos de los Pony rod, que tienen el fin de evitar las fugas de aceite o entrada de polvo en el interior del power end también aporó al desarrollo de la falla de este equipo. Si este hubiera sido expuesto y se hubieran evidenciado ralladuras o desgaste, sería el indicio que los sellos ya estaban gastados.

5.4. Recomendaciones generales

- El equipo tiene componentes críticos que se repararon con el más estricto control de calidad, se recomienda realizar un monitoreo 24 horas después del arranque a estos elementos para verificar su comportamiento y sus valores de torque.
- Se recomienda reemplazar el sistema de empaquetadura de las bombas en el cuerpo de fluidos, por el sistema original auto ajustable que permite reducir las fugas de producto al ambiente. Evitando con esto el deterioro del skid y la contaminación del aceite del cuerpo de potencia.
- Se presentó desgaste adhesivo en los casquetes por pérdida total de la película lubricante, esto se determina por marcas de barrido en el sentido de giro y por pérdida del 80 % del material que lo conforma.
- Las fallas en el muñón del cigüeñal y la biela corresponden a un desgaste adhesivo por la pérdida de la película de lubricante y por contacto directo entre el casquete y el muñón.
- La reconstrucción de la biela generó una desviación mínima total de 0.039" en su longitud total, lo cual no afectó su recorrido operacional en la carrera efectiva de trabajo hidráulico, ya que esta corrección se realizó en la tapa.
- Se debe tener presente que toda máquina tiene sus niveles normales de ruido, vibración y temperatura. Cuando se observa algún aumento anormal de estos niveles, se tienen los

primeros indicios de que hay alguna falla. Los operadores de campo de las máquinas deben ser instruidos para que reporten al detectar estos síntomas que presenta la máquina.

- Debió asegurarse que los amortiguadores de pulsaciones estuvieran en buenas condiciones y comprobar que la purga de aire durante el cebado de una bomba en una unidad de fracturamiento. Al bombearse agua lodosa de alta viscosidad almacenada en tanques de desplazamiento durante mucho tiempo, se debe hacer circular el lodo hacia los tanques antes de bombearlo con el fin de evitar que se gelatinice o limite la succión.
- Para la puesta en marcha del equipo reparado, se debe implementar la curva de la bañera como forma de detección de fallas en el ensamble, el periodo mínimo aceptado por el cliente es de 72 horas.
- Se determinó que el nivel de aceite de las maquinas se pierde considerablemente sin razón aparente, realizando un seguimiento al comportamiento del equipo se concluye que la razón se debe a las inspecciones de los operadores de campo, quienes al verificar el nivel del carter abren la válvula dejando correr el aceite para determinar si esta emulsionado, pero *no reponen el aceite drenado*, esto realizado 4 veces al día durante la semana, deja al equipo trabajando en condiciones mínimas de lubricación hasta la inspección técnica de mantenimiento que se cumple a las 360 horas, por recomendación del fabricante.
- Antes de reemplazar una pieza que a fallado es crucial determinar la causa exacta del daño para poder implementar los correctivos necesarios. Deben implementarse sensores de nivel por alta vibración en la bomba para parada de emergencia.

6 Conclusiones

- El análisis de falla es un procedimiento sistemático y metodológico, que permitió aplicar los conocimientos en el uso de pruebas y equipos de laboratorio, con el fin de identificar los cambios en la geometría y la resistencia de los elementos mecánicos que fallaron durante la operación del equipo. El informe generado a raíz de las distintas indagaciones sobre las fallas que se presentaron en los componentes mecánicos, nos permitió cuestionarnos sobre el *¿Por qué?* y el *¿Cómo?* de las circunstancias que generaron las fallas mecánicas, así mismo nos permitió establecer la planeación necesaria para la reparación de los componentes mecánicos que conforman el equipo, tal como fue descrito en el presente trabajo.
- En Bogotá y Cartagena, donde se realizaron los trabajos de reparación, se cumple con los niveles de seguridad y calidad para la reparación de componentes críticos en tiempos cortos. La experiencia y tecnología de la industria nacional puede superar los retos actuales que requieren los equipos que antes solo se podían reparar por el fabricante o reemplazando las piezas.
- Como conclusión final, el equipo fallo por falta de mantenimiento y verificación de los parámetros operacionales de la bomba, establecidos en la curva de operación de la bomba. La vibración excesiva del equipo que fracturo las tuberías más esbeltas del sistema de lubricación forzada, hizo que se perdiera la presión del sistema, dejando el cigüeñal solo con la lubricación por salpique del carter, el cual no es el suficiente para la operación del equipo.

7 Anexos

	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS		ITL-END- F- 015				
	REPORT DE INSPECCION DE PARTICULAS MAGNETICAS		VERSIÓN. 00				
			FECHA: 12/04/2016				
DATOS GENERALES							
NOMBRE DE LA EMPRESA:	BOMBAS Y MONTAJES SAS	No. INFORME:	17-014	No. PAGINA: 1/1			
FECHA INSPECCIÓN:	17/05/2017	INSPECTOR:	ING. GUSTAVO GONZALEZ CASTRO				
CLIENTE :	BOMBAS Y MONTAJES SAS	DEPARTAMENTO:				
CIUDAD :	BOGOTA	CONTRATO:				
ESPECIFICACIÓN (NORMA):	AWS D1.1 / ASTM E709	PROCEDIMIENTO:	IT-MT-O				
DATOS DEL TRABAJO							
EQUIPO :	DOS (2) CROSSHEAD BOMBA CLYDEUNION POOQB		IDENTIFICACIÓN:			
PLANO No.		LUGAR INSPECCIÓN:	PLANTA BOMBAS Y MONTAJES			
PARTES INSPECCIONADA:	100% C/CROSSHEAD		ESPECIF. MATERIAL:	FUNDICION			
SUPERFICIE DE INSPECCIÓN:	EXTERNA / INTERNA		COND. SUPERFICIAL:	LIMPIA			
LONGITUD DE INSPECCIÓN:	100%		TEMPERATURA:	AMBIENTE			
METODOLOGIA							
MÉTODO	HÚMEDO	(X)	SECO	(-)			
TIPO PARTICULAS	VISIBLES	(-)	FLUORESCENTES	(X)			
COLOR PARTICULAS	VERDES	(X)	ROJAS	(-)			
MÉTODO DE MAGNETIZACIÓN	CONTINUO	(X)	RESIDUAL	(-)			
TIPO DE MAGNETIZACIÓN	CIRCULAR	(-)	LONGITUDINAL	(X)			
TIPO DE CORRIENTE	AC	(X)	DC	(-)			
EQUIPO UTILIZADO	LÁMPARA UV	(X)	YOKE	Y-6			
NIVEL DE SENSIBILIDAD	N A		HWAC	(-)			
AMPERAJE	6 Amp.		PROD	(-)			
DISTANCIA ENTRE PINZAS	N A		BOBINA (-)				
RESULTADOS							
Item	DESCRIPCION	SITIO INSPECCIONADO	INDICACION		EVALUACION		
			TIPO	LONGITUD (mm)	LOCALIZACION	ACEPTABLE	RECHAZADO
1	CROSSHEAD No.1	100%	SI	NO
2	CROSSHEAD No.2	100%	SI	NO
ANEXO FOTOGRAFICO							
							
OBSERVACIONES							
MEDIANTE INSPECCIÓN CON PARTICULAS MAGNÉTICAS FLUORESCENTES A DOS (2) CROSSHEAD, NO SE ENCONTRARON INDICACIONES RELEVANTES.							
INSPECTOR		CLIENTE		INTERVENTORIA			
Nombre: ING. GUSTAVO GONZALEZ C.		Nombre:		Nombre :			
Fecha: 17/05/2017		Fecha:		Fecha :			

Figura 7-1: Ensayos no destructivos cross head



REPORTE DE RESULTADOS

REPORTE No: 040517/1

TITULO:

Inspección con partículas magnéticas fluorescentes al cigüeñal y engranaje de baja velocidad de la bomba TRIPLEX marca CLYDE PUMP con serial PH110032A2 y TAG P-004b.

EMPRESAS PARTICIPANTES:

Empresa que realiza la inspección: CWI LTDA.

Empresa que solicita la inspección: BOMBAS Y MONTAJES SAS.

Empresa interesada: PINTO HERNANDEZ.

LUGAR Y FECHAS:

Fecha de inspección: Cartagena, 03 de mayo de 2017.

Fecha de reporte: Cartagena, 04 de mayo de 2017.

INTRODUCCIÓN:

En este reporte se presentan el informe de las indicaciones halladas en el cuerpo del cigüeñal y del engranaje de baja velocidad de la bomba TRIPLEX marca CLYDE PUMP con serial PH110032A2 y TAG P-004b. Utilizando el método de ensayo no destructivo con partículas magnéticas MT bajo los parámetros establecidos por ASTM E 1444 Standard Practice for Magnetic Particle Examination y ASTM E 709 Standard Guide for Magnetic Particle Examination.

Todas las nomenclaturas, abreviaturas, código de colores están discriminadas y explicadas en los planos adjuntos de los anexos.

METODO DE INSPECCION:

Ensayo No Destructivo; Método de inspección con partículas magnéticas.

CODIGO, ESTANDAR, NORMA O ESPECIFICACION:

ASME V

CWI – Inspecciones Certificadas de Soldaduras

NIT: 900526264-0

Urb. Prado Verde Casa 59 Roble, Plan parejo, Turbaco - Bolívar

E mail: cwicolombia@gmail.com

Figura 7-2: Reporte de partículas magnéticas cigüeñal (a).

**AREA EXAMINADA:**

- Muñones del Cuerpo del cigüeñal de la bomba TRIPLEX marca CLYDE PUMP con serial PH110032A2 y TAG P-004b.
- Dientes del engranaje de baja velocidad de la bomba TRIPLEX marca CLYDE PUMP con serial PH110032A2 y TAG P-004b.

TECNICA UTILIZADA:

Inspección con partículas magnéticas fluorescentes

TIPO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS:

Partículas magnéticas fluorescentes húmedas.

EQUIPOS DE MAGNETIZACIÓN:

YOKES.

PREPARACIÓN SUPERFICIAL:

Las superficies inspeccionadas están libres de pinturas, recubrimientos metálicos, o de incrustaciones que requieran limpiezas mecánicas. Las capas de suciedades presentadas se retiraron con líquido desengrasante limpiador solvente.

PROCESO DE MAGNETIZACIÓN:

Continúa indirecta.

CORRIENTE DE MAGNETIZACIÓN:

- Primer barrido con corriente alterna.
- Segundo barrido con corriente continua.

DIRECCION DEL CAMPO DE MAGNETIZACIÓN:

Longitudinal.

IDENTIFICACION DE LA PIEZA:

Elemento:

- Bomba TRIPLEX marca CLYDE PUMP con serial PH110032A2 y TAG P-004b.

Piezas:

- Cigüeñal de la bomba TRIPLEX marca CLYDE PUMP con serial PH110032A2 y TAG P-004b.
- Dientes del engranaje de baja velocidad de la bomba TRIPLEX marca CLYDE PUMP con serial PH110032A2 y TAG P-004b.

CWI – Inspecciones Certificadas de Soldaduras

NIT: 900526264-0

Urb. Prado Verde Casa 59 Roble, Plan parejo, Turbaco - Bolívar

E mail: cwi colombia@gmail.com

Figura 7-3: Reporte de partículas magnéticas cigüeñal (b).



Identificación de los sectores:

Láminas Verticales Entrada Transformador hacia el lado 14		
ITEM	SIGLA	SECTOR
1	MA	Muñón lado Acople
2	MC	Muñón Central
3	ML	Muñón lado Libre
4	E	Engranaje de Baja Velocidad.

Código de colores:

Verde: Liberada.

Rojo: Reparación

Amarillo: Pendiente por inspeccionar.

RESULTADOS:

ITEM	SIGLA	INSPECCIONADA	INDICACIONES	RESULTADO
1	MA	Si	Huellas de desgaste por fricción	Reparar
2	MC	Si	Huellas de desgaste por fricción	Aceptado
3	ML	Si	Huellas de desgaste por fricción	Aceptado
4	E	Si	Huellas de desgaste por fricción.	Aceptado

JOSE LUIS VÉGA LIZCANO
Ingeniero Metalúrgico – UIS

Inspector con Partículas Magnéticas Nivel II ASNT/AWS TCA-SNT-TC-1A/2011

FIN DEL REPORTE

CWI – Inspecciones Certificadas de Soldaduras
NIT: 900526264-0

Urb. Prado Verde Casa 59 Roble, Plan parejo, Turbaco - Bolívar
E mail: cwicolombia@gmail.com

Figura 7-4: Reporte de partículas magnéticas cigüeñal (c).

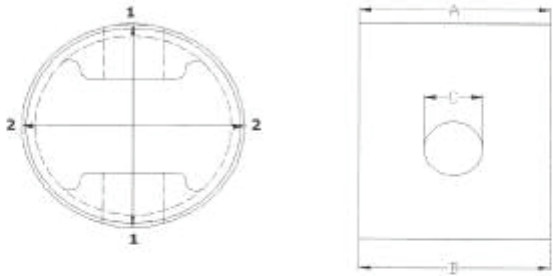


BOMBAS Y CONTENEDORES S.A.S.		METROLOGIA EVALUACION PISTONES - PASADOR								
		FOR: GM-03	FECHA DE EMISIÓN: 26-Abr-2013	VERSIÓN: 002						
FECHA	INICIAL:	4/05/17	FINAL	O.T.I. No. 6014-13						
										
P/S No.	DIAMETRO A		DIAMETRO B		Ø C	D	MEDIDA E			
	1-1	2-2	1-1	2-2			1	2	3	4
1	7.617"	7.619"	7.617"	7.619"	3.500	3.502"				
2	7.619"	7.619"	7.617"	7.619"	3.500	3.502"				
3	7.618"	7.619"	7.619"	7.619"	3.500	3.502"				
4										
5										
6										
OBSERVACIONES GENERALES Y CRITERIOS DE REUSABILIDAD					LISTADO DE EQUIPOS DE MEDICIÓN	CÓDIGO				
Se observan fisuras en el pin de ajuste del buje y el cross Head #1. No hay mucha área de trabajo cross Head #2. Tiene fisuras en el mismo tallo con mucha cantidad.					micrometro exteriores	61022647				
ELABORADO POR:					REVISADO POR:					
FIRMA: 					FIRMA: 					
NOMBRE: Alexander Sulzra					NOMBRE: Juan Carlos Bernal					
CARGO: T. mecánico					CARGO: T. mecánico					

Figura 7-5: Metrología de los componentes de la bomba (a).

BOMBAS Y MONTAJES S.A.		METROLOGÍA COJINETES DE BIELA Y MUÑONES CIGÜENAL													
FCR-GW-029		FECHA DE EMISIÓN: 20-Abr-2013		VERSIÓN 002											
FECHA	3/09/17	INICIAL	X	FINAL											
				O. T. I. No.: C-014-17											
BIELA No.	COJINETE BIELA				MUÑÓN CIGÜENAL				HOLGURA A	ESTADO COJINETE			ESTADO MUÑÓN		
	MEDIDA D1		MEDIDA D2		MEDIDA B1		MEDIDA B2			B	R	M	B	R	M
	1-1	2-2	1-1	2-2	1-1	2-2	1-1	2-2							
1	N/A	N/A	N/A	N/A	7.04	7.04	7.04	7.04	N/A						
2	7.025	7.025	7.03	7.03	7.03	7.03	7.03	7.03	0.03"	X			X		
3	7.03	7.03	7.035	7.035	7.035	7.035	7.035	7.035	0.03"	X			X		
4															
5															
6															
ESPECIFICACIONES SEGUN GUIA DE CAT SERB3108-01 Y MANUAL ESPECIFICACIONES SSNR3592-01															
MEDIDA	DESCRIPCIÓN										ESPECIFICACIÓN				
A															
B															
D															
OBSERVACIONES GENERALES Y CRITERIOS DE REUSABILIDAD					LISTADO DE EQUIPOS DE MEDICIÓN					CÓDIGO					
no se ciñen según especificaciones					micrometro exterior					61C226-17					
ELABORADO POR					REVISADO POR										
FIRMA: Yamil P. ...					FIRMA: Juan Chacon										
NOMBRE: Yamil P. ...					NOMBRE: Juan Chacon										
CARGO: TECNICO					CARGO: JEFE MECANICO										

Figura 7-6: Metrología de los componentes de la bomba (b).

COLINEALIDAD ENTRE CIRCULOS								
	1	2			3			4
A	0.000"	0.000"	0.000"	0.000"	0.000"	0.000"	0.000"	0.000"
B	+0.001"	+0.001"	+0.001"	+0.001"	+0.001"	+0.000"	-0.001"	N/A
C	+0.001"	+0.003"	+0.005"	+0.004"	+0.001"	+0.001"	0.000"	-0.001"
D	+0.002"	+0.003"	+0.004"	+0.003"	+0.001"	+0.001"	0.000"	0.000"

(a)

PERPENDICULARIDAD				
	1	2		4
A	0.000"	0.000"	0.000"	0.000"
B	-0.001"	+0.002"	0.000"	-0.002"
C	-0.003"	+0.003"	+0.001"	-0.001"
D	-0.002"	+0.002"	N/A	-0.001"

(b)

Figura 7-7: Metrología de la carcasa. a). Medición de la colinealidad entre círculos. b). Medición de perpendicularidad.

Bibliografía

- [1] DE CHIZZELLE, Yan K.: *Method and a system for early detection of defects in multiplex positive displacement pumps*. Februar 24 1998. – US Patent 5,720,598
- [2] NERI, MA ; CARREÑO, C ; MARTINEZ-VILLAFANE, A: Analisis de Falla de una Cabeza de Bomba de Combustible, Agrietada Internamente.
- [3] TACKETT, Herbert H. ; CRIPE, James A. ; DYSON, Gary [u. a.]: Positive displacement reciprocating pump fundamentals-power and direct acting types. En: *Proceedings of the 24th International Pump Users Symposium* Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories, 2008
- [4] WACHEL, JC ; DENISON, JC ; SZENASI, FR: Analysis of vibration and failure problems in reciprocating triplex pumps for oil pipelines. En: *Am. Soc. Mech. Eng.,(Pap.);(United States)* 85 (1985), Nr. CONF-850201-